

Messungen der Vibrationsexposition am Arbeitsplatz

Aktueller Stand der Messtechnik

Uwe Kaulbars, Sankt Augustin

Einwirkungen von Ganzkörper- und Hand-Arm-Vibration werden mit Messgeräten nach DIN EN ISO 8041 gemessen. Die Norm enthält neben Mindestanforderungen an die Eigenschaften und Genauigkeit für Messeinrichtungen auch ein zur Qualitätssicherung erforderliches System der Überprüfung und Kalibrierung. Die rasante Entwicklung der Elektronik und Miniaturisierung führt zu Schwingungsaufnehmern, die bereits die Messverstärker bis hin zur Signalverarbeitung, also das gesamte Messgerät enthalten. Die derzeit verfügbaren Schwingungsmesser werden mit ihren Eigenschaften dargestellt und Hinweise für spezifische Einsatzfälle gegeben¹⁾.

Die Messungen zur Ermittlung der Vibrationsexposition sind entsprechend der Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung [1] nach dem Stand der Technik durchzuführen. Die technische Regel zur Verordnung TRLV „Vibration“ [2] führt dazu genauer aus, dass Messeinrichtungen, die die Anforderungen der Norm DIN EN ISO 8041 [3] erfüllen, geeignet sind. Die Verwendung von anderen Messeinrichtungen wird nicht ausgeschlossen, jedoch ist dann sicherzustellen, dass diese Messeinrichtung zum gleichen Ergebnis führen.

Neben dem Bereich der Arbeitsplatzmessungen werden die Anforderungen nach DIN EN ISO 8041 auch an die Mess- und Prüfeinrichtungen zur Ermittlung der Vibrationswerte gemäß EU-Maschinenrichtlinie [4] sowie für die Prüfung von Vibrationsschutz, z. B. von Fahrzeu-ten oder Vibrations-Schutzhandschuhen, gestellt. DIN EN ISO 8041 enthält detaillierte Anforderungen an die Ausstattung und Eigenschaften von Schwingungsmessgeräten, definiert Toleranzgrenzen und beschreibt deren Prüfung. Die Anhänge umfassen normative Anforderungen für eine einheitliche Dokumentation der technischen Messgerätespezifikation sowie informative Hinweise zur Spezifikation der Schwingungsaufnehmer und der Prüfung ihrer Ankopplungsvorrich-

tungen. Die für die Qualitätssicherung erforderlichen Kalibrierungen und Überprüfungen der Messeinrichtung sind mit unterschiedlichen Anforderungen und Aufwand in ein abgestuftes System – bestehend aus Baumusterprüfung, Nachprüfung und Prüfung am Einsatzort – unterteilt [5].

Die derzeit noch gültige Fassung der ISO 8041 wurde bereits 2005 veröffentlicht und berücksichtigt noch in hohem Maße Messgeräte mit analoger Signalverarbeitung. Heutige Messgeräte sind fast ausschließlich digital aufgebaut und stellen darüber hinaus teilweise die für die Nachprüfung notwendigen Schnittstellen nicht mehr zur Verfügung (z. B. IEPE-Sensoren „Integrated Electronic Piezo Electric“ oder MEMS „Micro-electro-mechanical system“). Auch hat die Praxis gezeigt, dass die Nachprüfungen entsprechend der noch gültigen Norm mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nicht durchführbar sind. Aus diesem Grund hat die Kommission für Arbeitsschutz und Normung ein Positionspapier mit konkreten Verbesserungsvorschlägen erstellt [6].

Zur Anpassung der Norm an die Messgeräteentwicklung und Kalibriertechnik wird derzeit eine Ergänzung zur Norm ISO 8041 erarbeitet, mit deren Veröffentlichung Anfang 2014 zu rechnen ist. Diese Ergänzung wird erstmals auch Informationen zur Vorgehensweise der Abschätzung der Gesamtmessunsicherheit des Messgeräts nach GUM [7] enthalten.

Schwingungsmesseinrichtung

Zur Durchführung von Vibrationsmessungen an Arbeitsplätzen sind für Hand-Arm-Vibrationen die Messnorm DIN EN ISO 5349 [8] und für Ganzkörper-Vibrationen die DIN EN 14253 [9] bzw. ISO 2631 [10] heranzuziehen. Dazu ist eine Schwingungsmesseinrichtung [11] bestehend aus einem Schwingungsmesser und allen für die Messung notwendigen Zusatz- und Hilfeinrichtungen, z. B. Kalibrator und Ankopplungsvorrichtungen, erforderlich.

Der Umfang sowie die Kosten der Zusatz- und Hilfeinrichtungen können diejenigen des Schwingungsmessers überschreiten.

Weiterführende Informationen zur Hilfeinrichtung sind in DIN 45662 [12] oder den jeweiligen Messnormen enthalten.

Aufbau des Schwingungsmessers

Wesentliche Aufgabe des Schwingungsmessers ist die Erfassung der physikalischen Größe, ihre Umwandlung in ein Messsignal, das den gesuchten Messwert repräsentiert, und der Ausgabe des Messwerts. Prinzipiell können die mechanischen Schwingungen (Vibrationen) mit den Schwingungsgrößen „Weg“, „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ beschrieben werden. Aus praktischen Gründen hat sich die Erfassung der Beschleunigung durchgesetzt. Nach der bisherigen Messtechnik besteht der Schwingungsmesser aus einem oder

¹⁾ Die Begriffe Schwingungen und Vibration werden synonym verwendet.

mehreren Beschleunigungsaufnehmern, Messleitungen und einer Messwertverarbeitung mit Anzeige und digitalem Speicher bzw. Ausgabe. Die zunehmende Miniaturisierung der Elektronik ermöglicht die Integration aller Elemente in den Schwingungsaufnehmer.

Zum besseren Verständnis des Signalpfades (siehe Bild 1) kann dieser in einen linearen und einen nicht linearen Signalverarbeitungsteil unterteilt werden.

Die lineare Verarbeitung führt durch Überlagerung mehrerer Funktionen zu den gleichen Ergebnissen; d. h. auch nach der Verarbeitung kann die ursprüngliche Größe wieder hergestellt werden.

Die nicht lineare Signalverarbeitung dient vor allem zur Datenreduktion. Bei dieser Verarbeitung fließen Bewertung- und Beurteilungskriterien ein. So kann beispielsweise nach der Effektivwertbildung nicht mehr auf die Signalform und den Scheitelwert geschlossen werden.

Die Schnittstellen dienen in erster Linie zur Kalibrierung und Überprüfung der Messkette.

Schwingungsaufnehmer

Abhängig vom Anwendungsgebiet, dem Messobjekt und der Messaufgabe sind angepasste Schwingungsaufnehmer mit entsprechenden Ankopplungsvorrichtungen zu verwenden. Weicht man von den Empfehlungen der Messgerätehersteller ab, so ist die Anschlussmöglichkeit der folgenden unterschiedlichen Arbeitsprinzipien der Schwingungsaufnehmer zu berücksichtigen:

- piezoelektrische Sensoren,
- piezoresistive Sensoren,
- induktive Sensoren,
- IEPE-Sensoren mit eingebautem Impedanzwandler.

Empfehlungen zu den wesentlichen Spezifikationen werden getrennt nach Hand-Arm- und Ganzkörper-Vibrationen in DIN EN ISO 8041 für folgende Merkmale gegeben:

- Aufnehmermasse einschließlich Ankopplungssystem,
- Abstand des Messachse von der Ankopplungsfläche,
- Einfluss durch Umgebungsbedingungen (Temperatur, elektromagnetische Felder, Schalldruck, Staub und Spritzwasser),
- Querempfindlichkeit,
- Messbereich,
- Arbeitsfrequenz.

Die Ankopplungsvorrichtung hat als Bindeglied zwischen Messobjekt und

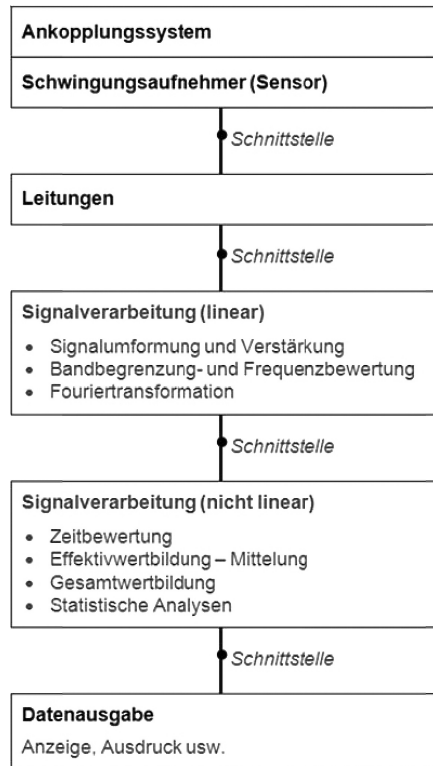


Bild 1 Schematische Darstellung des Signalpfades eines Schwingungsmessers.

Aufnehmer einen wesentlichen Einfluss auf die Vermeidung von systematischen Messabweichungen (Messfehlern). Für Ganzkörper-Schwingungsmessungen auf Sitzen ist die Ankopplung des Schwingungsaufnehmers für eine halbelastische Scheibe mit Abmessungen festgelegt (Bild 2). Für Hand-Arm-Schwingungsmessungen ist die Ankopplung an die Oberflächenbeschaffenheit anzupassen

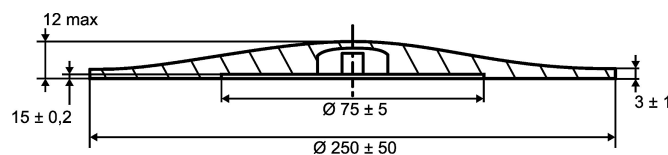


Bild 2 Aufbau der halbelastischen Messscheibe für die Messungen auf Sitzen.

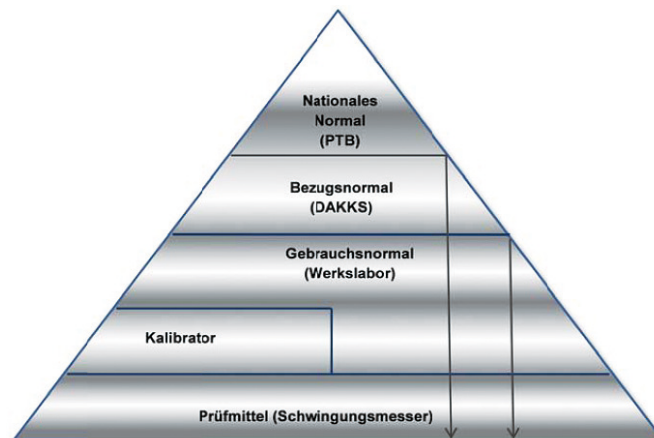


Bild 3 Kalibrierhierarchie – Rückführung.

und für bestimmte Messaufgaben zusätzlich mit mechanischen Filtern zu versehen.

Kalibrator und Kalibrierbereiche

Die Einhaltung der Spezifikationen des Schwingungsmessers und die damit zu erwartende Messgenauigkeit werden durch „Rückführung“ sichergestellt (Bild 3). Rückführung bedeutet den Vergleich des Messwerts eines Messgeräts unmittelbar oder über mehrere Stufen einer Kalibrierhierarchie mit dem nationalen Normal. Für Deutschland befindet sich das nationale Normal für Beschleunigung bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) [13.]

Der mechanische Kalibrator wird auf der untersten Ebene der Kalibrierhierarchie zur Prüfung des Schwingungsmessers am Einsatzort eingesetzt. Er erzeugt eine mechanische Schwingung mit festgelegten und bekannten Eigenschaften.

Für Ganzkörper-Schwingungen wird eine Sinusschwingung mit dem Effektivwert von $1 \text{ m/s}^2 \pm 3 \%$ bei einer Frequenz von 15,915 Hz und für Hand-Arm-Schwingungen ein Effektivwert von $10 \text{ m/s}^2 \pm 3 \%$ bei einer Frequenz von 79,577 Hz empfohlen.

Weitere Spezifikationen und Genauigkeitsanforderungen enthält die Norm DIN EN ISO 8041 [3].

Die Kalibrierung erfolgt über den gesamten Signalverlauf mit dem Ziel nachzuweisen, dass zumindest für eine Frequenz und Amplitude die vorgegebenen Fehlergrenzen eingehalten werden.

Checkliste zur Auswahl eines Schwingungsmessers

- Ermittlung des vorgesehenen Einsatzes
 - Labor- oder Feldmessungen?
 - Ganzkörper- oder Hand-Arm-Schwingungen?
 - Art der Messobjekte, z. B. Gebäude oder Landfahrzeug?
- Anforderungen an die Ausstattung
 - Soll eine spätere Auswertung z. B. nach neuem Verfahren möglich sein?
 - Welche Messgrößen werden benötigt?
 - Sind Frequenzanalysen erforderlich?
 - Sind besondere Umgebungsbedingungen zu erwarten?
 - Welche Mindestmesszeit benötigt das Messgerät?
- Weitere Entscheidungskriterien
 - Schnittstellen und Kompatibilität zu anderen Geräten?
 - Benutzerfreundlichkeit, einfache Bedienung?
 - Kalibriermöglichkeit und Prüfangebot
 - Fehlererkennung und Service
 - Sind Hilfsmittel z. B. Ankopplungsvorrichtungen lieferbar?
- Feststellung der geeigneten Anbieter

Messkette, die die Erfassung weiterer Versuchsparameter erleichtert und damit eine hohe Flexibilität bei unterschiedlichen Messaufgaben bietet, bevorzugt werden.

Ein weiteres Kriterium ist die Art der Schwingungseinwirkung. Für Ganzkörper-Schwingungsmessungen auf Landfahrzeugen sind netzunabhängige Messgeräte mit einer Betriebs- und Datenspeicherungsdauer möglichst größer acht Stunden zu empfehlen. Sollte mit der Messung auch die Beurteilung des Fahrersitzes erfolgen, so ist ein mehrkanliges Messgerät (> 6) erforderlich.

Für Langzeitmessungen können Programme zum Erkennen und Eliminieren von Störeinflüssen, z. B. fehlender Kontakt des Probanden zum Messobjekt, hilfreich sein. Für Hand-Arm-Schwingungen sind insbesondere Aufnehmer mit kleinen Abmessungen und geringem Gewicht zu nennen.

Sollen spätere Auswertungen z. B. nach neuem Beurteilungsverfahren möglich sein, so ist die Speicherfähigkeit der Rohdaten erforderlich.

Abhängig von den erfolgreichen Messgrößen sind z. B. für den Spitzenwert oder Übertragungsfunktionen besondere Anforderungen an den Phasenfrequenzgang zu beachten. Dies gilt ebenso für die Erfassung und Analyse von sehr schnellen Vorgängen,

Auswahl eines geeigneten Messgeräts

Auch wenn eine Vielzahl von Messgeräten den Anforderungen der Norm DIN EN ISO 8041 entspricht, so haben die unterschiedlichen Ausstattungen und Messgeräteeoptionen je nach Anwendungsfall und Anwender ihre Vor- und Nachteile. Ein optimales Messgerät, das für alle Anforderungen geeignet ist, kann aus heutiger Sicht noch nicht empfohlen werden. Folgende

Erläuterungen zur Checkliste geben eine Orientierungshilfe für die Auswahl.

Soll das Messgerät ausschließlich unter Laborbedingungen, z. B. für Vibrationsprüfungen, eingesetzt werden, sind gegebenenfalls die zum Teil hohen Anforderungen an die Festigkeit gegenüber den Umwelteinflüssen nur für den Aufnehmer und die Leitungen notwendig. Auch kann für diese Fälle eine Einzelanfertigung einer



Bild 4 Schwingungsmessgerät

Hersteller: Larson Davis, USA, Vertrieb: Wölfel, Höchberg, Typ: HVM-100
 Besonderheiten: Aufnehmer: piezoelektrisch und ICP; dreikanalig; vier Messbereiche (Abstufungen 20 dB); Batteriebetrieb; extrem klein und leicht (300 g); neue Ganzkörper-Bewertung; Analogausgänge



Bild 5 Schwingungsmessgerät

Hersteller: Norsonic, Norwegen, Vertrieb: TippKemper Oelde, Typ: Nor133/136
 Besonderheiten: Aufnehmer: piezoelektrisch und ICP; drei- oder sechskanalig; Frequenzanalysen; Lärmmessungen synchronisiert möglich; Rohdatenspeicherung; Batteriebetrieb



Bild 6 Schwingungsmessgerät.

Hersteller: Brüel & Kjær, Dänemark; Typ: 4447;

Besonderheiten: Aufnehmer: ICP; dreikanalig; Akkubetrieb; sehr klein und leicht



Bild 7 Schwingungsmessgerät.

Hersteller: SVANTEK, Polen, Vertrieb: RePo Messtechnik GmbH, Typ: SV 106

Besonderheiten: Aufnehmer: ICP; sechskanalig; Batteriebetrieb; Frequenzanalyse (1/3 Oktav) optional; zweikanalig für Kraftsensoren; USB-Schnittstelle und Rohdatenspeicherung



Bild 8 Schwingungsmessgerät.

Hersteller: Sinus, Leipzig, Typ: SOUNDBOOK

Besonderheiten: Aufnehmer: ICP und piezoelektrisch (mit Adapter); achtkanalig; Rohdatenspeicherung und Frequenzanalyse; „Webcam“ Aufnahmen und Lärmmessungen parallel; Netz- und Batteriebetrieb

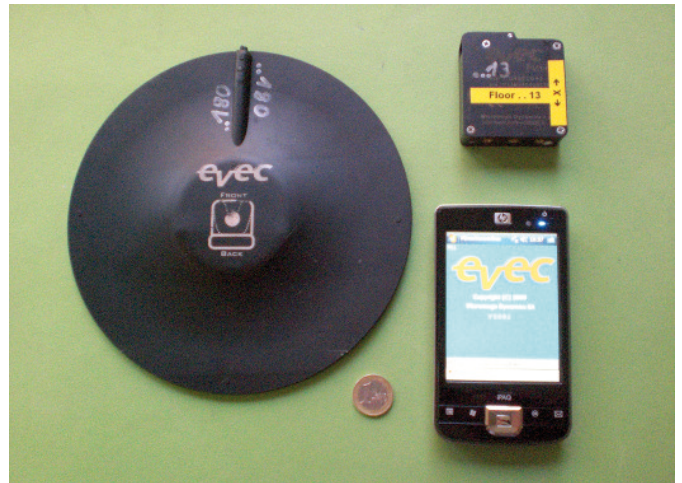


Bild 9 Dosimeter für Ganzkörper-Schwingungen.

wie Einzelschlägen, bei denen auch die Möglichkeit der Signaltriggerung und kurze Integrationszeiten wichtig sind.

Übersicht von Schwingungsmessern

Die in den Bildern 4 bis 8 aufgeführten Messgeräte vermitteln einen Überblick; sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Reihenfolge ist zufällig und entspricht keiner Rangfolge. Alle Geräte sind mit unterschiedlichen Beschleunigungsaufnehmern für Hand-Arm- und Ganzkörper-Schwingungsmessungen geeignet. Die zu den Bildern angegebenen Besonderheiten bieten nur einen ersten Eindruck; die vollständig technische Beschreibung ist vom Hersteller anzufor-

dern oder auf dessen Internetseiten abzurufen.

Dosimeter und Hilfsgeräte zur Abschätzung der Tagesdosis

Dosimetrische Messungen können mit den Schwingungsmessern nach DIN EN ISO 8041 [3] durchgeführt werden. Diese Messungen erfordern jedoch spezielle Kenntnisse und ein hohes Maß an Erfahrung.

Kleine kompakte Dosimeter sollen die Durchführung der Messungen vereinfachen und die Erfassung der Vibrationswirkung über die gesamte Arbeitschicht ermöglichen. Normative Festlegungen wie beim Lärm werden derzeit nicht er-

arbeitet. Da der Begriff des Schwingungs- bzw. Vibrationsdosimeters bisher nicht definiert ist, werden unter der Bezeichnung auch Hilfsgeräte, die lediglich eine Schätzung der Tagesdosis ermöglichen, auf dem Markt angeboten. Diese Geräte erfassen ausschließlich die Expositionsdauer und berechnen die Tagesdosis auf der Grundlage eines eingegebenen festen Schätzwertes. Da nach Lärm- und Vibrations-Arbeitschutzverordnung die Gefährdungsbeurteilung auch auf der Grundlage einer Schätzung zulässig ist, können diese sehr preiswerten und einfach zu benutzenden Hilfsmittel zur Orientierung sehr nützlich sein. Auch können diese „Schätzhilfen“, die eine direkte persönliche Rückmeldung zur

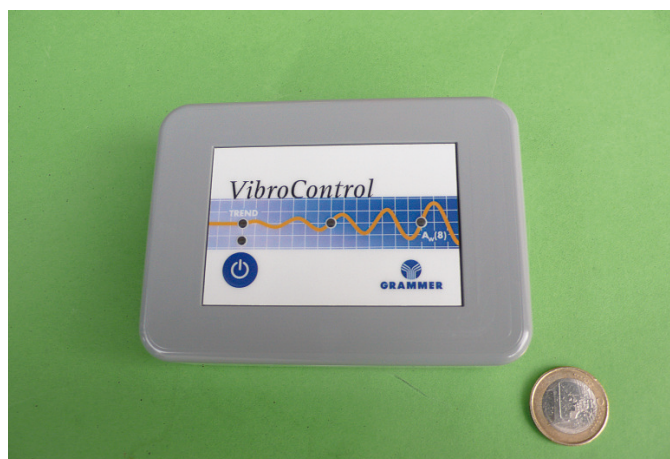


Bild 10 „Schätzhilfe“ für Ganzkörper-Schwingungen.

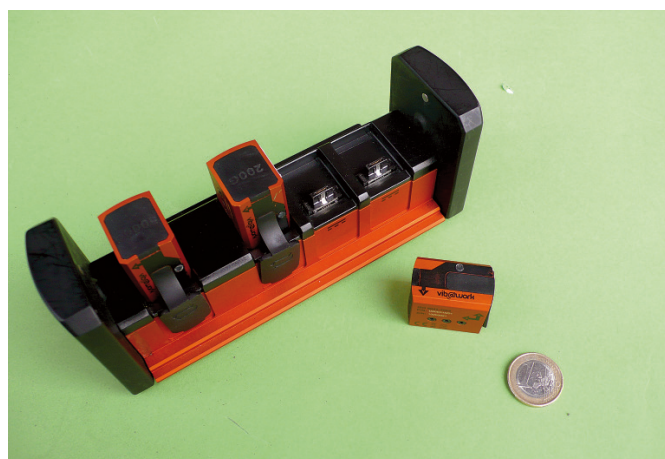


Bild 11 Dosimeter für Hand-Arm-Schwingungen (maschinengebunden).



Bild 12 Dosimeter für Hand-Arm-Schwingungen (personengebunden).



Bild 13 „Schätzhilfe“ für Hand-Arm-Schwingungen (maschinengebunden).

Schwingungsbelastung liefern, zur Verhaltensänderung und damit Reduzierung der Vibrationsbelastung eingesetzt werden.

Eine weitere Variante von „Dosimetern“ sind Geräte, bei denen die Schwingungseinwirkung zwar gemessen wird, jedoch nicht die im Messverfahren festgelegten Messgrößen oder an den Messpunkten. Bild 9 zeigt ein Messgerät für Ganzkörper-Schwingungen, bei dem Sensoren und die Signalverarbeitung in einer normgerechten Ankopplungsvorrichtung (Messscheibe) integriert sind.

Die Steuerung und Auslesung der Daten erfolgt kabellos über Bluetooth. Die Bedienung erfordert Fachkenntnisse und ist für Experten geeignet. Hingegen kann die ebenfalls nur für die Ganzkörper-Schwingungen ausgelegte „Schätzhilfe“ (Bild 10) von Fahrzeughaltern bedient werden. Das Gerät ermöglicht keine normgerechte Messung, da z. B. der Messpunkt am Fahrersitz nicht entsprechend der Messnormen angebracht werden kann. Für den Bereich der Hand-Arm-

Schwingungen ist die Tagesdosis häufig bei der Benutzung mehrerer vibrierreicher Geräte und Maschinen zu bestimmen.

Personengebundene Dosimeter (Bild 11), bei denen der Sensor in einen Handschuh integriert ist, benötigen keinen zusätzlichen Aufwand für die Zuordnung und Zusammenfassung der Teilvibrationen. Bei diesen Messsystemen können jedoch Fehlmessungen durch Kontaktresonanzen und durch die Beeinträchtigung der Griffsituation auftreten.

Das Dosimeter in Bild 12 ist maschinengebunden und erfordert für jedes vibrierende Gerät ein separates System. Normgerechte Messungen sind aufgrund der Baugröße und der damit verbundenen möglichen Abweichungen von den in den Messnormen festgelegten Messpunkten nicht in allen Fällen möglich. Beide Systeme erfordern aufgrund der Komplexität ein spezielles Fachwissen des Anwenders.

Bild 13 zeigt eine einfache „Schätzhilfe“, die auch ohne Messerfahrung vom Maschinenbenutzer anwendbar ist. Das

Gerät ist ebenfalls maschinengebunden, sodass der Benutzer beim Wechsel der vibrierenden Maschine die Zwischenergebnisse ablesen muss. Weitere Informationen bietet [14].

Da die Entwicklung der Messtechnik auch bisher Einfluss auf die Beurteilungsverfahren genommen hat, sind künftige Systeme zur Erfassung der Belastung auf der Grundlage anderer Belastungsgrößen, beispielsweise mittels „Smartwatches“, denkbar. Jedoch ist bis zur Anwendung dieser Systeme noch Forschungs- und Entwicklungsaufwand erforderlich.

TS 327



Autor

Dipl.-Ing.
Uwe Kaulbars, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), Sankt Augustin.

Literaturverzeichnis

- [1] Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) vom 6. März 2007. BGBl. I, S. 261, zul. geänd. durch Art. 3 der Verordnung vom 19. Juli 2010. BGBl. I, S. 960.
- [2] Technische Regel Vibration (TRLV Vibrationen) vom 10. März 2010. GMBI. (2010) Nr. 14-15, S. 271 ff.
- [3] DIN EN ISO 8041: Schwingungseinwirkung auf den Menschen – Messeinrichtung. Berlin: Beuth-Verlag 2006.
- [4] Richtlinie 98/37/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Juni 1998 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Maschinen. ABl. EG Nr. L 207 vom 23. Juli 1998, S. 1-46.
- [5] *Kaulbars, U.*: Messung, Bewertung und Beurteilung der Hand-Arm-Vibrationsbelastung an Arbeitsplätzen. Kennzahl 210 520. In: BGIA-Handbuch Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz. 48. Lfg. V/2006. Hrsg.: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin. Berlin: Erich Schmidt – Losebl.-Ausg. 2. Aufl. 2003. www.ifa-handbuchdigital.de/210520
- [6] *Kaulbars, U.; Palka, B.*: Vibrationsmessgeräte: Überarbeitung von EN ISO 8041. sicher ist sicher – Arbeitsschutz aktuell 63 (2012) Nr. 6, S. 268-269.
- [7] DIN V ENV 13005: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Berlin: Beuth-Verlag 1999.
- [8] DIN EN ISO 5349-1: Mechanische Schwingungen – Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Berlin: Beuth-Verlag 2012.
- [9] DIN EN 14253: Mechanische Schwingungen – Messung und rechnerische Ermittlung der Einwirkung von Ganzkörper-Schwingungen auf den Menschen am Arbeitsplatz im Hinblick auf seine Gesundheit – Praxisgerechte Anleitung. Berlin: Beuth-Verlag 2007.
- [10] ISO 2631-1: Mechanische Schwingungen und Stöße – Bewertung der Einwirkung von Ganzkörper-Schwingungen auf den Menschen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Berlin: Beuth-Verlag 1997.
- [11] DIN 45661: Schwingungsmesseinrichtungen – Begriffe. Berlin: Beuth-Verlag 2012.
- [12] DIN 45662: Schwingungsmesseinrichtungen – Allgemeine Anforderungen und Prüfung. Berlin: Beuth-Verlag 1996.
- [13] *Beckmann, T.*: Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern durch Schwingungs- und Stoßanregung. 5. VDI-Tagung Humanschwingungen, 28.-29. Mai 2013, Dresden. VDI-Berichte Nr. 2190, S. 39-50. Düsseldorf: VDI-Verlag 2013.
- [14] *Pitts, P. M.; Kaulbars, U.*: Consideration of standardisation requirements for „vibration dosimeters“. 5. VDI-Tagung Humanschwingungen, 28.-29. Mai 2013, Dresden. VDI-Berichte Nr. 2190, S. 25-34. Düsseldorf: VDI-Verlag 2013. www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2013_150.pdf